

4 TEORÍA DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

4.1 Introducción

En este capítulo se entra, de cierta manera, en el estudio teórico de dichos dispositivos, teniendo sobre todo un enfoque práctico en lo referente en el tratamiento de señales, que es el tema al cual se va a aplicar los amplificadores operacionales el proyecto en cuestión. No se va a entrar en detalle en lo concerniente a la estructura interna pues no es práctica para el trabajo en general. Por tanto, la principal idea de este capítulo es el recordatorio de su funcionamiento para un entendimiento mejor.

4.2 El amplificador operacional

El amplificador operacional (AO) es un dispositivo integrado en una sola pastilla cuya característica fundamental es su elevada ganancia en tensión. El nombre de operacional se debe al uso que de él se hacía en los primitivos ordenadores analógicos, capaces de realizar operaciones aritméticas de distinto grado de complejidad (circuitos sumador, restador, integrador, diferenciador...). Es conocido también como circuito integrado lineal o analógico. En la actualidad el amplificador operacional es un elemento muy utilizado en aplicaciones tales como, por ejemplo, amplificación, filtros, rectificación, generadores de señal, comparadores, etc., que son muy distintas que aquellos para los que fue diseñado inicialmente.

El amplificador operacional es un dispositivo con entrada diferencial, es decir, tiene dos entradas en oposición de fase. En la figura se muestra el símbolo utilizado para representar el AO. La entrada negativa es inversora, esto quiere decir que la señal de salida se encuentra en oposición de fase respecto a la aplicada a dicho terminal. La entrada positiva es la no inversora.

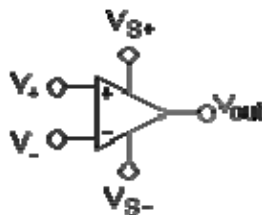


Figura 4.1 Amplificador operacional

Internamente el amplificador operacional está constituido, básicamente, por varias etapas diferenciales y por una etapa de salida (pastilla de silicio). Las entradas (+ y -) del circuito son las correspondientes a la primera etapa diferencial, la cual suele tener una configuración analógica, ya que se desea obtener una elevada resistencia de entrada. Las siguientes etapas diferenciales, conectadas a la salida de la primera, proporcionan una ganancia de tensión adicional. Para la etapa de salida se suele emplear una configuración en colector común o seguidor de emisor (transistores) para amplificar en corriente y para facilitar una baja resistencia de salida.

Los amplificadores operacionales suelen ir asociados a una red externa de realimentación que limita la elevada ganancia de tensión que proporciona el dispositivo cuando funciona en bucle abierto.

4.3 Características del amplificador operacional

En primer lugar se describirá las características ideales más significativas de un amplificador operacional y posteriormente se señalará las características reales de un AO de uso general.

Los valores característicos de un AO ideal son los siguientes:

- Ganancia de tensión en bucle abierto: Infinita.
- Resistencia de entrada: Infinita.
- Resistencia de salida: Cero.
- Ancho de banda: Infinito.

Además el AO ideal proporciona una tensión de salida nula cuando se aplica la misma tensión a sus dos entradas. Por otra parte, la variación de la temperatura no altera el valor de sus características.

Seguidamente relacionamos los valores típicos reales de un amplificador operacional:

- Ganancia de tensión en bucle abierto: 100.000.
- Resistencia de entrada: 1 M Ω .
- Resistencia de salida: 100 Ω .
- Ancho de banda (ganancia unidad): 1 MHz.

4.4 Montajes del amplificador operacional

4.4.1 Montaje inversor

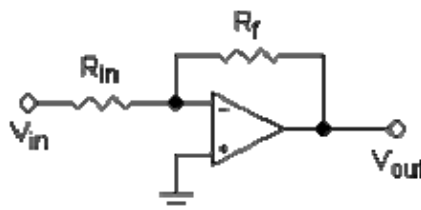


Figura 4.2 Montaje inversor

En esta configuración la señal se introduce por la entrada negativa del amplificador, estando la entrada positiva conectada a tierra.

En análisis del circuito, considerando el modelo ideal de amplificador operacional, es el correspondiente:

- Idealmente $V_+ = V_- = 0$, correspondientes a las entradas no inversora (V_+) e inversora (V_-) del amplificador, debido a la conexión de tierra de V_+ .
- Definiendo y despejando las intensidades que circulan por R_{in} y R_f :

$$\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = - \frac{V_{out} - 0}{R_f}$$

despejando V_{out} resulta

$$V_{out} = -V_{in} \cdot \frac{R_f}{R_{in}}$$

- La impedancia de entrada del montaje es:

$$Z_{in} = R_{in}$$

Como se puede observar en la fórmula obtenida, la ganancia en tensión del amplificador con realimentación negativa es una ganancia negativa, o sea, invierte la señal. Este es uno de los montajes elementales más utilizados con amplificadores operacionales.

4.4.2 Seguidor de tensión

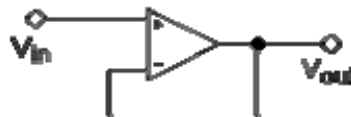


Figura 4.3 Seguidor de tensión

El caso del seguidor de tensión es un caso particular del circuito AO en el montaje no inversor, donde la resistencia R_{in} vale infinito y la R_f vale cero. Por tanto, la conexión de la señal se realiza en la entrada no inversora y la entrada inversora es realimentada con la señal de salida.

La tensión de salida tiene el mismo valor que la entrada y, por tanto, la ganancia de tensión vale la unidad, $V_{out} = V_{in}$. La impedancia de entrada del montaje seguidor, Z_{in} , es infinito pues la señal está conectada directamente a la entrada no inversora del AO. En el modelo real este valor ya no es infinito, sino el valor designado por el fabricante, que aún así seguirá siendo un valor elevado.

Una de las principales utilidades del seguidor es el uso de buffer para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia o viceversa).

4.4.3 Montaje restador o montaje diferencial

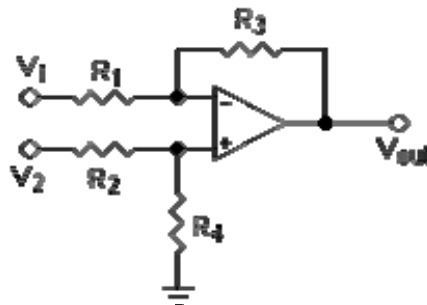


Figura 4.4 Montaje diferencial

En la figura se muestra un amplificador diferencial, denominado también amplificador de instrumentación por el uso que de él se hace para amplificar señales procedentes de sensores que miden temperaturas, presiones, etc. Las prestaciones que han de ofrecer los AO que se utilizan para construir amplificadores de instrumentación son, fundamentalmente, una elevada resistencia de entrada y una elevada relación de rechazo en modo común, ya que, por lo general, las señales que se han de amplificar contienen una componente de cc de elevado valor, común en ambas entradas del dispositivo.

El procedimiento para calcular la tensión de salida en función de las tensiones de entrada en el montaje diferencial es el que se describe a continuación:

- Así que calculando la diferencia de potencial entre V_1 y V_{out} , por un lado, V_2 y V_{out} , por el otro, se tiene

$$V_1 = R_1 \cdot i_1 + R_3 \cdot i_3 - V_{out}$$

$$V_2 = R_2 \cdot i_2 + R_4 \cdot i_4$$

- Puesto la intensidad que circula por las entradas el AO es cero, al ser su impedancia ideal infinita, la intensidad que circula por R_1 y R_3 son iguales, lo mismo se puede decir de las intensidades que circulan por R_2 y R_4 .

$$i_1 = i_3$$

$$i_2 = i_4$$

- Así que despejando y teniendo presente que las tensiones de entrada el AO (V_+ y V_-) son iguales

$$V_{out} = V_2 \cdot \left(\frac{(R_3 + R_1) \cdot R_4}{(R_4 + R_2) \cdot R_1} \right) - V_1 \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Esta es la ecuación que relaciona la tensión de salida con la diferencia de tensiones de entrada. Para simplificar la ecuación se suele poner en el montaje las resistencias $R_1=R_2$ y $R_3=R_4$.

$$V_{out} = -(V_1 - V_2) \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Con esta ecuación se simplifica significativamente los cálculos del valor de salida al tener una relación mucho más sencilla puesto la ganancia va a ser proporcional a dos parejas de resistencias.

La impedancia de entrada corresponde a la suma de las resistencias conectadas entre las entradas de las señales y el AO

$$Z_{in} = R_1 + R_2$$

4.4.4 Montaje integrador

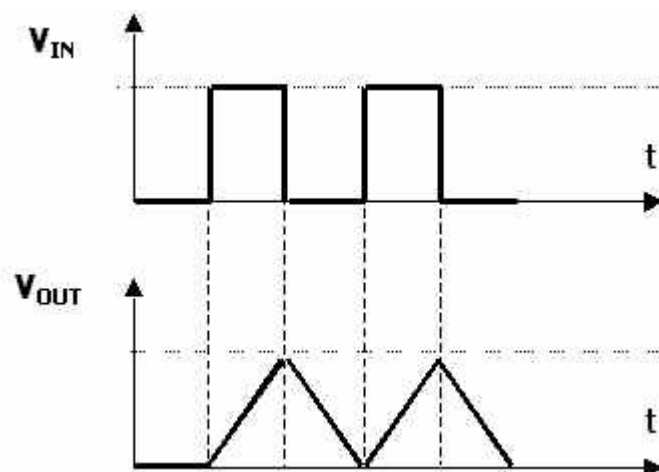
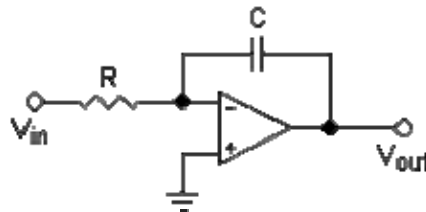


Figura 4.5 Montaje integrador y forma de onda

El montaje integrador parte del montaje inversor al cual se le ha retirado la resistencia de recirculación, la comprendida entre el terminal V_+ y la salida del AO, siendo sustituida por un condensador. La ecuación que rige su funcionamiento simplificada es

$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{R \cdot C} dt + V_{inicial}$$

La señal de entrada, V_{in} , es integrada e invertida. La tensión $V_{inicial}$ es la tensión de salida en el origen de tiempos ($t=0$). Una de las principales utilidades de este circuito es la utilización como filtro

4.4.5 El comparador



Figura 4.6 El AO como comparador

El comparador, en realidad, no es un circuito simple y único sino puede haber diversas tipologías en función de la señal que se quiera comparar y rango de comparación. Existe en el mercado diferentes dispositivos integrados diseñados para realizar esta tarea en función de la señal a comparar, el más conocido es el LM311.

Una característica esencial que lo hace muy diferentes a otras topologías es que mientras los montajes anteriores existe algún tipo de realimentación, en el comparador este no se da. Así, compara las dos entradas y saca una salida en función de qué entrada sea mayor.

$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

Según la expresión, escogiendo una referencia, V_2 por ejemplo, para una señal de entrada superior a V_2 , la salida será igual a la tensión positiva de alimentación del AO, V_{S+} . Para una tensión inferior a V_2 , la salida será igual a la tensión negativa de alimentación del AO, V_{S-} .

Usos típicos se puede encontrar, por ejemplo, en transformar, si se puede considerar el término más propicio, una señal analógica en una señal digital. Así, ante la entrada de diferentes señales, unas superiores y otras inferiores a la referencia, la salida se compondrá de un “tren de pulsos” los cuales para un dispositivo digital, DSP por ejemplo, puede ser reconocido para su posterior análisis y actuación.